

溃坝模型试验研究综述

李 云, 李 君

(南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 从溃坝洪水、溃坝机理等方面对溃坝模型试验研究情况进行了详细回顾, 概括总结了国内外在溃坝模型试验方面所取得的主要成果, 并从研究内容、相似理论、模型比尺及测试手段等方面对溃坝模型试验的现有水平及未来发展动向进行了分析, 认为今后仍需大力开展溃坝模型试验研究, 并以溃坝机理研究为重点, 不断提高试验研究水平, 为大坝安全提供有力的技术保障。

关 键 词: 溃坝; 模型试验; 综述

中图分类号: TV698.237; G853.11

文献标识码: A

文章编号: 1001-6791(2009)02-0304-07

为充分利用水资源, 人们在天然河流上修建了水库大坝, 以达到调控洪水、发电、灌溉、供水、通航、旅游、渔业养殖等目的。2005年底, 世界上坝高超过15 m以上的大坝共有50 000多座, 其中中国有22 000多座^[1], 并且越来越多的大坝正在兴建或规划之中。水库大坝对人类社会和经济的发展起到了极其重要的推动作用, 但是一旦由于某种原因发生溃坝失事, 对下游所造成的生命和财产损失将无法估计, 例如, 1959年法国Malpasset拱坝、1963年意大利Vajont拱坝、1975年中国板桥、石漫滩水库大坝、1976年美国Teton坝以及1993年中国沟后面板砂砾坝等大坝的失事均给下游造成了灾难性的后果^[2,3]。

基于溃坝后果的严重性, 世界各国对于大坝的安全问题均给予了高度的重视。自19世纪以来, 各国学者分别从理论分析、物理模型试验、数值模拟、溃坝洪水计算模型研究、历史资料统计分析等方面对溃坝问题进行了详细的研究。近年来, 各国政府又着重开展了溃坝风险评估、大坝监测和预警系统开发、应急预案制定以及溃坝机理等研究。

尽管溃坝问题研究主要以数值模拟及历史资料统计分析为主, 但物理模型试验仍是研究溃坝问题不可或缺的技术手段。溃坝模型试验成果不但可以弥补溃坝历史资料在数量及可靠性上的局限, 亦可为数值模拟提供验证数据, 并在溃坝机理研究方面具有上述两种手段无可比拟的优越性。溃坝模型试验研究始于19世纪中叶, 大致经历了两个阶段: 早期(19世纪末至20世纪80年代)主要以溃坝洪水研究为主, 而近期(20世纪90年代以来)的研究重点则放在溃坝机理上。

1 溃坝模型试验研究概况

1.1 溃坝洪水模型试验研究

溃坝洪水模型试验的目的主要有几方面: 一是校核溃坝波理论解, 二是验证溃坝洪水数值模拟结果, 三是研究洪水演进特性及其影响范围。试验研究的主要内容包括溃坝波水力特性、溃坝坝址峰顶流量、坝址水位流量过程以及洪水演进规律等。

(1) 溃坝波理论解校核试验研究 自1892年德国学者Ritter给出简化条件下的溃坝波理论解^[4]后, 奥地利、美国、前南斯拉夫、法国等国的学者对其进行了大量试验进行校核。通过试验研究发现, 当坝体下游原先干涸时, 溃坝波在下游波峰附近为凸曲线形式而非Ritter解所给出的凹曲线, 且坝址水深大于Ritter解, 实际波峰传播速度由于受阻力影响较Ritter解减小; 而当坝体下游有水且水深较小时, 溃坝波形状则接近理论解。

收稿日期: 2008-01-09

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目“水库大坝安全保障关键技术研究”(2006BAC14B00)

作者简介: 李 云(1962-), 男, 江苏高淳人, 教授级高级工程师, 硕士, 主要从事水工水力学研究。E-mail: yli@nhri.cn

无论下游是否干涸,坝体溃决后上游各瞬时的水面线则都不符合 Ritter 解,且负波向上游传播的速度大于 Ritter 解。中国学者谢任之则从理论上对上述差异进行了详尽地分析及探讨^[5]。

(2) 溃坝波水力特性研究 在对溃坝波理论解进行校核的同时,各国学者也对溃坝波相关水力特性进行了系统研究。试验以研究瞬时溃坝为主,内容涉及溃坝波型式、波高及波速变化、溃坝波传播规律及上、下游水面变化、河床阻力、河床底坡、下游初始水深及下游河道型式等对溃坝波的影响等。除进行概化试验外,法国曾对失事的 Malpasset 拱坝进行了溃坝模型试验(正态模型,比尺为 1:400),所给出的溃坝波的波峰传播速度与实测值基本相同,且试验中各地最高水位有 80% 与实测值之差小于 2 m,误差约 15%。

(3) 溃坝洪水流量研究 国内外溃坝洪水流量研究主要有两类,一类是通过大量试验总结出溃坝洪水流量的经验公式。例如, Schoklitch 于 1949 年根据试验成果提出了瞬间部分溃坝的坝址峰顶流量经验公式^[6],而中国铁道部科学研究院在进行板桥水库溃坝模型试验时,分别针对 7 种库长、5 种坝长、8 种坝高、15 种横向局部溃坝情况、8 种竖向局部溃坝情况等组合条件共进行了约 600 次水工试验,总结出了可用于任何溃决情况的溃坝最大流量计算公式^[7]。第二类则是为数学模型计算成果进行验证。欧盟委员会于 1998 年启动了 CADAM 项目,旨在完整地评价现有溃坝模型的水平,并进一步改进现有溃坝模拟技术,从而建立最为先进的溃坝模拟指南与实用技术^[8]。评价过程从解析解验证,进而到水槽断面试验及整体物理模型试验验证,最终为实际溃坝事故的验证。为此,各国学者进行了相关的模型试验并采用了国际水力学研究协会(IAHR)的前期研究成果以及相关的溃坝实测资料。验证结果表明,现有数学模型精度有限,预测的溃坝最大流量与实测值相差约 $\pm 50\%$,因此建议采用敏感性分析方法进行典型区域的溃坝流量预测。

(4) 溃坝洪水演进研究 溃坝洪水演进过程直接关系到下游居民防护及撤离等紧急措施的实施,因此各国学者对此方面的研究较为重视,研究成果较多。

20 世纪 50 年代及 80 年代,为配合三峡工程设计和科研任务,中国水利水电科学研究院及长江水利委员会分别进行了三峡大坝小比尺(水平比尺 1:30000,垂直比尺 1:300)及大比尺(水平比尺 1:500,垂直比尺 1:125)变态模型溃坝试验^[9]。试验针对不同库水位及相应库容、不同入流条件和溃决条件等组合进行了大量试验,确定了洪水波演进路线、下游淹没范围、灾害损失以及相应的防护对策等,并提出了不同库水位下的运行方案。清华大学水利系在 60~70 年代前后做过密云、郭堡、庞庄、子洪等 4 座水库的溃坝洪水试验,均采用变态模型^[5]。70 年代黄河水利委员会水利科学研究所针对小浪底水库进行了溃坝试验(水平比尺 1:1000,垂直比尺 1:100),通过试验总结出了坝址流量及溃坝下游断面流量过程线等经验公式^[5]。铁道部科学研究院针对板桥水库进行的溃坝模型试验(水平比尺 1:1000,垂直比尺 1:100)中,模型溃坝洪水波经历 40km 的传播后其水位变化过程与水文站实测资料相当吻合^[7]。

前南斯拉夫学者卢地·雷塔曾根据模型试验,提出了一套概化过程线以求洪水演进^[10],之后中国学者谢任之在此基础上又进行了扩展^[5]。于 2001 年启动的欧盟 IMPACT 项目中专门设立了洪水演进研究课题。课题主要分为城市洪水及天然地形下的洪水演进两大研究内容^[11],模型试验作为该课题的主要研究手段,目的是为了更好地了解溃坝洪水的水力特性,并为数学模型验证提供可靠的数据。城市洪水模型试验主要研究了建筑物周围水流的具体特征、常规的水流流态以及洪水与城市间的相互作用关系。天然地形下的洪水演进研究中则重点量测洪水演进过程中的水位流量变化过程,从而为分析洪水波推进及数学模型验证提供可靠依据。

1.2 溃坝机理模型试验研究

在各种溃坝问题中,大坝溃决机理由于涉及到水文、地质、坝体材料性能、施工质量等诸多因素而尤为复杂,至今仍在探索过程中。但研究溃坝机理,对于了解大坝溃决发生、发展过程,掌握下游溃坝洪水演进规律,处置溃坝突发性洪水灾害,编制应急预案,发布洪水预警,组织撤离与逃生,实施紧急救援等,均具有十分重大的意义。由于土石坝自身的特点,其溃坝几率较其它坝型更大,且其溃决机理尤为复杂,因此溃坝机理研究重点在于土石坝溃决机理及其溃口发展过程。

20 世纪 50 年代末,美国曾进行了一系列土石坝溃决的水槽试验,还在现场进行了 1:2 的大比尺模型试验。

60 年代奥地利也对堆石坝溃决问题进行了大量室内试验,其最大模型高达 5.5 m,试验成果表明,上述试验的溃决时间比尺基本一致,而对于相同的护坡,坡度减缓时,冲开坝坡的临界水头将显著增加^[5]。90 年代开始,欧美国家将溃坝研究重点逐渐转移到溃坝机理上,包括美国国家大坝安全计划 (NDSP)^[12]、欧共体 IMPACT 项目^[13]等。其中,IMPACT 项目中共进行了 5 次大尺度现场试验(坝高 4~6 m)及 22 组室内小比尺试验(模型比尺 1:10~1:7.5)^[14],见表 1 及表 2。试验中针对不同坝型(均质坝、心墙坝)、不同坝体几何形状(不同坝坡、不同顶宽)、不同筑坝材料(非粘性材料、粘性材料)、不同材料性能(粒径级配、压实程度、含水量)、不同溃决型式(漫顶、管涌)等影响因素进行了详细的研究,取得了丰富的成果。通过现场及室内试验的研究分析,在溃坝机理方面得出以下结论:①无论对何种材料构成的堤坝,在发生漫顶情况下,其下游坝面的冲刷在开始阶段是缓慢渐进的,而当冲刷最终发展到坝顶上游边缘后,溃决过程将十分迅速剧烈。并且溃口首先向下发展到坝脚,随后才向两侧发展;②溃口边壁在溃决过程中几乎是垂直的;③坝体型式(均质、混合结构)、填筑材料性质(粘性、非粘性)、施工方法(压实度、含水量)及溃口发生位置等对溃口发展均有较大影响;④坝体内部冲刷过程首先从缺陷处开始,且持续较长时间,直至冲刷发展至坝顶才发生破坏。美国、新西兰等国家的学者也对土石坝溃决机理进行了相关试验研究^[15~18],亦得出了与上述类似的结论。

表 1 IMPACT 项目现场试验统计

Table 1 Summary of field tests for breach formation in the IMPACT project

序号	坝的类型	坝 体 参 数	破坏型式	试 验 工 况
1	均质土坝	坝高 6 m, 顶宽 2 m; 沙含量 15%; 粘土含量 25%; 含水量 30%; $d_{50}=0.009$ mm; 干密度 14.7 kN/m ³ 。	漫顶	顶部预留宽 3 m, 深 0.5 m 的引冲槽
2	均质砾石坝	坝高 5 m, 顶宽 3 m; 细粒土含量小于 5%; 含水量 7%; $d_{50}=4.65$ mm。干密度 21.15 kN/m ³ 。	漫顶	无堆石护坡
3	冰碛土心墙堆石坝	坝高 6 m, 顶宽 3 m, 心墙顶宽 1.5 m; 堆石体含水量 2.6%, $d_{50}=85$ mm, 干密度 20.8 kN/m ³ ; 冰碛土含水量 6%, $d_{50}=7$ mm, 干密度 20.5 kN/m ³ ;	漫顶	顶部预留宽 8 m, 深 0.2 m, 边壁垂直的引冲槽
4	冰碛土心墙堆石坝	坝高 6 m, 顶宽 3 m, 心墙顶宽 1.5 m; 堆石体含水量 2.6%, $d_{50}=85$ mm, 干密度 20.8 kN/m ³ ; 冰碛土含水量 6%, $d_{50}=7$ mm, 干密度 20.5 kN/m ³ ;	管涌	坝体内人为设置两条直径为 0.2 m 的管涌通道: 1. 管涌通道周围为 1 m×1 m 的沙质填土; 2. 与 1 类似, 但沙质填土通至坝顶。
5	均质冰碛土坝	坝高 4.5 m, 顶宽 3 m; 冰碛土含水量 6%, $d_{50}=7$ mm, 干密度 20.5 kN/m ³ ;	管涌	坝体内人为设置直径为 0.2 m 的管涌通道, 其周围为 1 m×1 m 的沙质填土。

表 2 IMPACT 项目室内试验统计

Table 2 Summary of laboratory tests for breach formation in the IMPACT project

系列	试 验 描 述	试 验 目 的
系列 1	此系列试验基于均质非粘性材料坝现场试验(表 1 中的第 2 组试验), 模型比尺为 1:10。模型坝体均由非粘性土料填筑。试验分别针对 3 种粒径级配、2 种溃口发生位置、2 种坝面坡度、2 种坝顶宽度以及考虑渗流影响等工况进行了 9 组试验。	进一步了解均质非粘性材料坝在漫顶情况下的溃口形成发展过程, 并确定坝体材料、坝体形状、渗流等因素对溃口形成发展过程的影响。
系列 2	此系列试验基于均质粘性材料坝现场试验(表 1 中的第 1 组试验), 模型比尺为 1:10。模型坝体均由粘性土料填筑。试验分别针对 2 种粒径级配、2 种压实程度、2 种含水量、3 种下游坝坡以及考虑渗流影响等工况进行了 8 组试验。	进一步了解均质粘性材料坝在漫顶情况下的溃口形成发展过程, 并确定坝体材料、土体性能、坝体形状、渗流等因素对溃口形成发展过程的影响。
系列 3	基于均质粘性材料坝现场试验(表 1 中的第 5 组试验), 模型比尺为 1:7.5, 共 2 组试验。 模型材料(粘性土)取自英国的一个防洪堤, 试样尺寸为 1 m×1 m×0.8 m(长×宽×厚), 共 3 组试验。	为现场试验管涌破坏机理研究提供验证资料。 研究管涌形成与发展过程。

自 20 世纪 70 年代起, 国内进行了一些自溃坝的模型试验研究。河南省曾针对鸭河口水库进行了 30 多次自溃坝试验, 模型比尺从 1:2 至 1:32。通过试验, 对引冲式自溃坝口门形成时间及下切率进行了详细的研究, 并总结出了口门形成时间及下切率与模型比尺的关系式^[19,20]。浙江省水利科学研究所于 1978 年针对南山水库在现场进行了坝体冲刷性能试验, 测量了引冲槽溃决水头和溃决历时以及坝体段的冲刷速率和冲刷过程, 认为影响坝体段的冲刷速率的因素除水头外, 主要取决于防渗墙型式及厚度^[21], 之后, 又通过一系列小比尺室内试验得出了冲刷率与模型比尺的关系^[22]。1993 年青海沟后砂砾石面板坝发生溃坝事故后, 南京水利科学研究

院和中国水利水电科学研究院均对其破坏机理进行了相关的物理模型试验研究。胡去劣等^[23]通过1:40的溃口局部模型及1:75的溃决过程半整体模型,详细研究了溃口水流参数、面板受力状况、面板溃决特性等,提出了面板坝溃决过程的模拟计算方法,计算取得的各项溃坝数据与沟后坝溃决后的现场调查资料较为吻合。刘杰等^[24]通过1:75溃坝水槽模型对沟后坝的渗流状态及溃决过程进行了相关试验研究,得出了沟后坝失事的主要原因。目前,南京水利科学研究院正在进行土石坝溃决机理的相关试验研究工作。

1.3 其它相关溃坝问题模型试验研究

溃坝过程中,溃坝水流将引起下游河床的冲刷,同时河床地貌的改变同样又影响溃坝水流的运动特性,因此泥沙运动是溃坝研究中不可或缺的组成部分。欧共体IMPACT项目中专门设立了泥沙运动课题^[25],其目的是研究在极大洪水条件下的泥沙运动规律及其模拟技术。通过模型试验手段,重点研究了泥沙分别在紧邻溃决或破坏点的运动(近场)及泥沙运动所导致的河道加宽、分叉等地貌形态的变化(远场),试验得出了含沙水流的流速分布、浓度分布及下游河道地貌的变化规律。

此外,芬兰RESCDAM项目对人体在洪水中的稳定性和机动性以及森林和建筑物的糙率^[26]、澳大利亚学者对溃坝产生的触变流运动特性^[27]及溃坝水流掺气^[28]、西班牙学者对溃坝波产生的涡旋^[29]、南京水利科学研究院和解放军理工大学对堤防溃口水力特性及堵口水力学^[30,31]等均进行了相关的模型试验研究。

2 溃坝模型试验研究发展动向

由溃坝模型试验研究概况可知,随着世界各国对大坝安全问题的重视程度不断提高、人们对溃坝问题研究的不断深入以及试验测试手段的不断改进,溃坝模型试验研究从无到有,从简单到深入不断地发展,并已成为今后溃坝研究的重点。

(1) 研究内容方面 最初的溃坝模型试验主要针对溃坝波特性,之后模型试验的研究内容逐步扩大到溃坝洪水演进、溃坝形成机理、溃口发展过程、溃坝过程中的泥沙运动及其对地形地貌的改变、洪水中人及建筑物的稳定性以及堵口水力学等研究领域。其中溃坝波的试验研究已处于较高水平,而其它方面尤其是溃坝机理、溃口发展及泥沙运动等方面的研究,尽管欧美国家已着力开展了研究工作,取得了较丰富的成果,但主要是针对均质土坝、堆石坝及土质心墙坝在漫顶情况下的溃坝研究,且由于筑坝材料种类繁多,筑坝工艺也不尽相同,目前所取得的实测资料相对而言较少。因此,今后仍需针对不同筑坝材料、不同坝型、不同坝体几何形状、不同溃决方式等进行大量研究,包括混凝土面板堆石坝及沥青混凝土心墙坝等新型坝型的溃坝机理研究,以及管涌情况下各种坝型的溃坝机理研究等,以不断充实溃坝实测资料,为进一步归纳分析以及为数学模型改进提供有力依据。

(2) 模型相似理论方面 溃坝模型试验除需满足几何相似及重力相似外,在研究溃坝过程时还需满足坝体材料相似,而在研究溃坝洪水演进过程时还需满足下游河道的阻力相似。由于溃坝过程涉及水力学、土力学、泥沙运动力学及结构力学等多方面相似问题的影响,因此在模型设计中无法完全满足坝体材料的相似。早期的试验中通常采用与原型相近的坝料、级配及坝体施工质量^[20,24],或者利用系列模型试验逐步逼近法来达到坝体材料相似的目的^[23]。近期则将泥沙输移理论引入溃坝研究^[16,17],认为坝体材料需满足泥沙输移相似,并且试验中应保证水流雷诺数及沙粒雷诺数分别大于1500和70,以确保水流粘滞力不会对试验结果产生影响。泥沙输移相似的引入,进一步完善了溃坝试验相似理论,对提高溃坝试验的精度起到了较大作用。今后应在进一步完善已有相似理论的基础上,针对混凝土面板、沥青混凝土心墙等新型坝体结构进行相关的模拟研究。此外,还需对模型施工工艺加以研究,以减小施工工艺所带来的不确定因素。在研究溃坝洪水的演进过程时,由于需采用变态模型,且所选取的变态率一般较大,因此,河道糙率模拟成为试验的关键。国内学者通过研究提出了宽浅河道及窄深河道糙率的相似准则^[32]以及沿水深分段加糙的方法^[33],但其精确度仍需大量实测河道糙率验证,国外则已对洪泛区内的森林以及建筑物的糙率进行了探索性研究^[26]。今后应着重开展不同地形条件下河道及洪泛区的糙率研究,并注重原型糙率资料的搜集整理。

(3) 模型比尺方面 对于溃决过程研究,国内外一般采取室外大比尺(1:1~1:2)模型试验及相应的室内小比尺(1:10~1:75)模型试验相结合的方法,例如国内的鸭河口水库自溃坝试验^[19,20]及欧盟的 IMPACT 项目的溃决过程试验^[14]。但由于大比尺模型在制作成本及时间上的限制,目前该方面的成果较少,最大坝高在 6 m 左右。基于溃决过程的复杂性,试验中的缩尺效应将直接影响到研究成果的精确性,因此,今后需进一步开展大比尺溃坝模型的研究,同时发挥小比尺模型造价低、制作工艺简单的优点,重点研究各种坝体材料参数及水流参数对溃决过程的影响,同时借助大比尺模型的研究成果研究溃坝模型的缩尺效应。

而对于溃坝洪水演进过程研究,一般均采用变态模型,水平比尺一般在 1:500~1:1000 之间,垂直比尺在 1:50~1:125 之间,也有试验采用了正态模型(三峡 1:500 模型,IMPACT 项目 T6ce 河 1:100 模型)。与溃决过程研究类似,今后应结合大比尺溃坝模型开展相应的大比尺溃坝洪水演进研究,并对模型的缩尺效应进行深入研究。

(4) 试验测试手段方面 最早的溃坝波试验仅依靠肉眼观察溃坝波的传播特性,之后则利用不同的水位测量仪器对典型断面的水位进行测量,并由最初的人工读取逐渐发展到计算机自动采集,同时利用摄像机来记录溃坝波传播过程。而随着现代流体测试技术的不断进步,在最近的试验中已采用了雷达测速技术^[34]、数字成像技术^[35,36]、Voronoi 成像技术^[37]、立体成像技术、界面成像技术、激光片光成像技术^[38]及粒子追踪技术等先进的测试手段对溃坝波和溃坝洪水中的泥沙运动进行观测研究。而在溃决过程研究中,除利用水尺、流量计(量水堰)、流速仪、测压计及摄像机外,IMPACT 项目还专门研制了用于记录溃口发展的专用传感器^[14],此种传感器由倾覆传感器及微处理器组成,用于记录传感器被水流冲走的时间,待试验结束,工作人员将其从下游河道内捡回,再将其中记录的信号读取出来,用以分析坝体溃决时间及发展过程。尽管溃坝试验测试手段有了较大进步,但至今仍无法精确测定溃坝非恒定流流量过程,且对于溃口的发展过程的测定也不完善,因此,今后在这两方面仍需进行深入研究。

3 结 论

随着中国经济的不断发展,水资源开发的脚步逐渐加快,越来越多的大坝正在兴建当中,与此同时所带来的大坝安全问题将成为今后政府和社会关注的热点。为有效防止及应对溃坝事故,极有必要进一步开展溃坝研究,尤其要大力开展溃坝模型试验研究,从溃坝形成机理入手,进而对溃坝洪水、泥沙运动等其它相关内容开展深入研究,从而为工程设计施工提供直接依据。

与欧美国家相比,中国的溃坝模型试验研究水平仍有不小差距,因此需借鉴国外先进技术、合作模式及成功经验,集中国内各方面力量,对溃坝模型试验研究进行大力支持,力求在溃坝机理、洪水演进、泥沙运动以及相关应急措施研究方面有所突破,并带动试验测试技术的发展,从而为中国的大坝安全提供有力的技术保障,并为今后制定大坝安全指南及紧急行动预案奠定坚实的基础。

参考文献:

- [1] 中国大坝委员会. 2005 年中国与世界大坝建设情况[EB/OL]. <http://www.chincold.org.cn/main.asp>. (Chinese National Committee on Large Dams. Summary of large dam constructions in China and the world until 2005[EB/OL]. <http://www.chincold.org.cn/main.asp>. (in Chinese))
- [2] 汝乃华, 牛运光. 大坝事故与安全: 土石坝[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001. (RU Nai-hua, NIU Yun-guang. Embankment dam: Incidents and safety of large dams[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2001. (in Chinese))
- [3] 汝乃华, 姜忠胜. 大坝事故与安全: 拱坝[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1995. (RU Nai-hua, JIANG Zhong-sheng. Arch dams: Accident and safety of large dams[M]. Beijing: China WaterPower Press, 1995. (in Chinese))
- [4] RITTER. Die Fortpflanzung der Wasserwellen[J]. Berlin: Verein Deutsch Ingenieure Zeitschrift, 1892, 36(33): 947 - 954.
- [5] 谢任之. 溃坝水力学[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1993. (XIE Ren-zhi. Hydraulics of dam break[M]. Jinan: Shandong Science and Technology Press, 1993. (in Chinese))

- [6] ROUSE. Engineering hydraulics[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1950.
- [7] 戴荣尧,王群.溃坝最大流量的研究[J].水利学报,1983(2):13-21.(DAI Rong-yao, WANG Qun. Research on maximum discharge of dam breaking[J]. Journal of hydraulic engineering, 1983(2):13-21. (in Chinese))
- [8] MORRIS. CADAM, concerted action on dam break modeling, final report[R]. Oxfordshire: HR Wallingford Ltd, 2000.
- [9] 陆遐龄.三峡工程防护问题研究的回顾[J].中国三峡建设,1995(2):23-24.(LU Xia-ling. Review on protective study of the Three Gorges Project[J]. China Three Gorges construction, 1995(2):23-24. (in Chinese))
- [10] 卢地 雷塔.溃坝波的数学模型和无因次计算图[C]//第十一届国际大坝会议译文选集.北京:水利电力出版社,1976.(Mathematical model and non-dimensional calculation chart for dam break wave[C]// Translation anthology of the proceeding of the 11th ICOLD congress. Beijing: China WaterPower Press, 1976: 38-49. (in Chinese))
- [11] ALCRUDO F, MULET J. Conclusions and recommendations from the IMPACT project WP3: Flood propagation [EB/OL]. <http://www.samui.co.uk/impact-project/wp3-technical.htm>.
- [12] FEMA. The National Dam Safety Program research needs workshop: embankment dam failure analysis[EB/OL]. <http://www.fema.gov/library/viewRecord.do?id=1454>.
- [13] MORRIS M W. IMPACT, investigation of extreme flood processes and uncertainty, final technical report [EB/OL]. <http://www.samui.co.uk/impact-project/general-publications.htm>.
- [14] MORRIS M W, HASSAN M, VASKINN K A. Conclusions and recommendations from the IMPACT project WP2: Breach formation [EB/OL]. <http://www.samui.co.uk/impact-project/wp2-technical.htm>.
- [15] HANSON G, COOK K, TEMPLE D. Research results of large-scale embankment overtopping breach tests[C]// Proceedings of the Association of State Dam Safety Officials annual conference. 2002: 809-820.
- [16] STEPHEN E C, DARRYL P A, GRANT M W. Overtopping breaching of noncohesive homogeneous embankments[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 128(9): 829-838.
- [17] DUPONT E, DEWALS B J, ARCHAMBEAU D, et al. Experimental and numerical study of the breaching of an embankment Dam[C]// Proceeding of the 32nd IAHR Biennial Congress, 2007, 1: 339-348.
- [18] FRABCA M J, ALMEIDA A B. Experimental tests on rockfill dam breaching process[EB/OL]. <http://www.samui.co.uk/impact-project/wp2-others.htm>.
- [19] 杨武承.引冲式自溃坝口门形成时间的试验及规律[J].水利水电技术,1984(7):21-25.(YANG Wu-cheng. Experiments and disciplines of the breach formation time of emergency dam[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1984(7): 21-25. (in Chinese))
- [20] 杨武承.引冲式自溃坝下切率规律的试验研究[J].水利水电技术,1985(3):1-7.(YANG Wu-cheng. Experimental study on the discipline of downcutting rate of emergency dam[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1985(3): 1-7. (in Chinese))
- [21] 浙江南山水库管理局,浙江省水利水电科学研究所.南山水库自溃坝试验阶段报告[J].浙江水利科技,1978(3):1-17.(Zhejiang Nanshan Reservoir Administration, Zhejiang Research Institute of Water Conservancy and Hydropower. Interim report of Nanshan reservoir emergency dam experiment[J]. Zhejiang Hydrotechnics, 1978(3): 1-17. (in Chinese))
- [22] 郝书敏.自溃坝模型试验方法初步探讨[C]//水利工程管理论文集第1集.北京:中国水利学会工程管理专业委员会,1984.(HAO Shu-min. Preliminary study on experimental methods of emergency dam[C]// Proceeding of hydraulic engineering management, Vol 1. Beijing: Engineering Management Professional Committee, CHES, 1984. (in Chinese))
- [23] 胡去劣,俞波.沟后面板坝溃决过程研究[C]//沟后面板砂砾坝破坏机理及溃决过程研究论文集.南京:南京水利科学研究所,1996.(HU Qu-lie, YU Bo. The study of the Gouhou concrete rockfill dam failure[C]// Proceeding of study of break mechanism and breach process of the Gouhou concrete face dam. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 1996. (in Chinese))
- [24] 刘杰.土石坝渗流控制理论基础及工程经验教训[M].北京:中国水利水电出版社,2006.(LIU Jie. Seepage control of earth-rock dams: theoretical basis, engineering experiences and lessons[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2006. (in Chinese))
- [25] ZECH Y, SOARES F, SPINIEWINE B, et al. Dam break induced flood modeling and sediment movement. IMPACT WP4 final scientific report [EB/OL]. <http://www.samui.co.uk/impact-project/wp4-technical.htm>.
- [26] Helsinki University of Technology. The use of physical models in dam-break flood analysis[EB/OL]. <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=13494&lan=EN>.
- [27] CHANSON H, COUSSOT P, JAMY S, et al. A study of dam break wave of thixotropic fluid: Bentonite surges down an inclined plane[R].

- Queensland : The University of Queensland , 2004.
- [28] CHANSON H. Two-phase flow characteristics of an unsteady dam break wave flow[C]// Proceeding of the 30th IAHR Biennial Congress. Greece : THEMA , Vol C2 , 2003 : 237 - 245.
- [29] CRESPO A J C. Vorticity generated by a dam break over a wet bed modeled by smoothed particle hydrodynamics[C]// Proceedings of the congress International Association for Hydraulic Research. Spain : Country of publication , 2007 : 773 - 782.
- [30] 韩昌海, 宣国祥, 赵建钧. 堤防溃口水力特性及堵口技术试验研究报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2003. (HAN Chang-hai, XUAN Guo-xiang, ZHAO Jian-jun. Experimental report of embankment breach hydraulic characteristics and crevasse repair technology [R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2003. (in Chinese))
- [31] 孙芦忠, 赵建钧, 严建国. 堤防溃口水力学特性及装配式箱型结构堵口技术试验研究报告[R]. 南京: 解放军理工大学, 2002. (SUN Lu-zhong, ZHAO Jian-jun, YAN Jian-guo. Experimental report of embankment breach hydraulic characteristics and crevasse repair technology using fabricated box structures[R]. Nanjing: PLA University of Science and Technology, 2002. (in Chinese))
- [32] 余常昭. 溃坝洪水模型试验的几个问题[J]. 水利学报, 1982(3): 41 - 46. (YU Chang-zhao. A few questions about dam failure flood experiments[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1982(3): 41 - 46. (in Chinese))
- [33] 孙德根, 傅宗甫. 狭窄库区和开阔溃坝区溃坝洪水物模试验研究[J]. 河海大学学报, 1996(6): 61 - 65. (SUN De-gen, FU Zong-fu. Experimental study on dam-break flood for narrow reservoir front and wide dam-break front[J]. Journal of Hohai University, 1996(6): 61 - 65. (in Chinese))
- [34] 戴荣尧, 王群, 蒋兵, 等. 雷达在测流中的应用[J]. 铁道工程学报, 1984(2): 45 - 46. (DAI Rong-yao, WANG Qun, JIANG Bin, et al. Application of Radar in velocity measuring[J]. Journal of Railway Engineering Society, 1984(2): 45 - 46. (in Chinese))
- [35] ROSI L, JÜRGEN K. Application of high-speed digital image proceeding to experiments on dam break waves [EB/OL]. <http://www.hrwallingford.co.uk/projects/CADAM/CADAM/index.html>.
- [36] CAPART H, FRACCAROLLO L, GUARINO L, et al. Recent developments in debris-flow characterisation by digital-imaging measurements [EB/OL]. <http://www.hrwallingford.co.uk/projects/CADAM/CADAM/index.html>.
- [37] CAPART H, YOUNG D L, ZECH Y. Voronoi imaging methods for the measurements of granular flows[J]. Experiments in Fluids, 2002(32): 121 - 135.
- [38] SOARES-FRAZAO S, GRELLER N L, SPINOWINE B, et al. Dam-break induced morphological changes in a channel with uniform sediments measurements by a laser-sheet imaging technique[J]. Journal of Hydraulic Research, 2007(45): 87 - 95.

Review of experimental study on dam break^{*}

LI Yun, LI Jun

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract : A detailed review of experimental study on dam-break is made in this paper. The key results of the experimental study on dam-break such as dam-break flood and dam-break mechanism at home and abroad are summarized, and its existing level and trend of development in the future are also analyzed from the angles of study contents, the similarity theory, the model scale, the test techniques and so on. It indicates that the experimental study should be greatly developed in the future and mainly focuses on the mechanism of dam-break, and keeps improving the study level in order to provide protection for the dam safety of China.

Key words : dam-break; experimental study; review

* The study is financially supported by the National Key Technologies R&D Program of China during the 11th Five-year Plan Period (No. 2006BAC14B00).